

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique

Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
MOHAMMEDI Imène Zoulikha

Intitulé

Modélisation en charge d'un générateur asynchrone autonome

Promoteurs :

MEKHTOUB Saïd
IMADOUCHE Malika

Ecole Nationale Polytechnique
UMM Tizi-Ouzou

ENP 2013

Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie
www.enp.edu.dz

ملخص

هذا العمل ينص على تمثيل المولد الكهربائي اللامتزامن ذو قفص السنجاب في النظام المشبع, نقوم بعدها بمحاكاة سلوك المولد المشتعل ذاتيا قبل و بعد وصله بشحن كهربائية مختلفة.

الكلمات المفتاحية

المولد اللامتزامن, قفص السنجاب, المحاكاة, التمثيل, نظام مشبع, الاشتعال الذاتية, شحنة كهربائية.

Résumé

Ce travail consiste à élaborer un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil en régime de fonctionnement saturé. Nous simulerons par la suite le comportement du générateur auto-amorçé à vide puis en charge.

Mots clés

Générateur asynchrone, cage d'écureuil, simulation, modélisation, régime saturé, auto-amorçage, charge électrique.

Abstract

This thesis consist to elaborate the saturated model of the squirrel cage asynchronous machine after that we simulate the behaviour of the bootstarpped generator without, then with different electrical charges.

Key words

Asynchronous generator, squirrel cage, generator, simulation, modelisation, saturated regime, bootstrap, electrical charge.

Remerciements

Je remercie en premier lieu mon Dieu de m'avoir donné la santé et la patience pour pouvoir terminer ce travail.

Je remercie particulièrement mes promoteurs M.Saïd MEKHTOUB et M^{me}.Malika IMADOUCHENE pour m'avoir suivie et soutenue pour réaliser ce travail. Je leur exprime ma gratitude pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et pour leurs soutien qu'ils m'aient apportée tout au long de la durée de préparation de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur le Président, pour l'honneur qu'il me fait et aux membres du jury pour avoir accepté de corriger et d'évaluer ce modeste travail.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent ici ma profonde reconnaissance.

Dédicaces

*A ma très chère grand-mère qui m'a renforcée aux moments les plus difficiles;
A ma mère qui n'a jamais cessé de me supporter et de me soutenir;
A mon père qui m'a facilité la dureté du parcours;
A mon frère que j'aime tant;
A ma sœur qui m'a comblée de bonté;
A mon Créateur qui m'a offert une famille pareille et qui m'a donné la force
physique et morale pour accomplir ce modeste travail;
A ceux dont le passage a été ancré dans ma mémoire et qui ne quitteront guère
mes souvenirs;
A tous mes proches;
A toutes mes amies;
A tous ceux qui ont contribué à ma formation depuis mon jeune âge;
A notre généreux bibliothécaire Âmi Salah et à mon binôme;
A tous ceux qui m'aiment gratuitement;
Je dédie ce travail.*

Imène Loufikha Mohammedi

SOMMAIRE

Liste des symboles	6
Introduction générale.....	8
Chapitre I : Modélisation de la machine asynchrone en régime saturé.....	10
Introduction	11
I.1.Prise en compte de l'effet de la saturation	11
I.2.Le phénomène de saturation croisée	11
I.3.Mise en œuvre du modèle saturé	12
Conclusion	16
Chapitre II : Auto-amorçage de la machine asynchrone à cage	17
Introduction	18
II.1. Prise en compte du phénomène de saturation	18
II.2.Simulations et résultats expérimentaux	19
II.2.1.Essai à vide.....	19
II.2.2.Essais en charge	22
II.2.2.a. Charge R.....	22
II.2.2.b. Charge R-L.....	24
II.2.2.c. Charge R-L-C	26
Conclusion	28
Conclusion générale	29
Annexe	35
Présentation du banc d'essai expérimental	36
Références bibliographiques	37

LISTE DES SYMBOLES

s, r : Indices respectifs du stator et du rotor de la machine à induction à cage.

a, b, c : Les trois phases du rotor.

d, q : L'axe direct et l'axe en quadrature dans le référentiel de R.H.Park.

$\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}$: Flux total par phase statorique respectivement rotorique.

i_{sabc}, i_{rabc} : Courant par phase statorique respectivement rotorique.

v_{sabc}, v_{rabc} : Tension par phase statorique respectivement rotorique.

R_s, R_r : Résistance d'une phase statorique, respectivement rotorique.

l_s, l_r : Inductance de fuites statorique, respectivement rotorique.

R'_r : Résistance d'une phase rotorique ramené au stator.

M_s, M_r : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques, respectivement rotoriques.

M_{sr}, M_{rs} : Inductance mutuelle stator-rotor.

M_{max} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une autre rotorique.

L_s, L_r : Inductance cycliques statorique, respectivement rotorique.

M : Inductance mutuelle cyclique.

p : Nombre de paires de pôles.

θ_s, θ_r : Angle statorique (respectivement rotorique) par rapport au repère d, q .

θ : Angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

Θ : La position mécanique de l'axe rotorique par rapporte à l'axe rotorique.

ω_s, ω_r : Pulsation statorique, respectivement rotorique.

ω : Pulsation électrique.

Ω : Vitesse mécanique.

i_{sd}, i_{sq} : Composantes du courant statorique suivant l'axe d , respectivement q .

i_{rd}, i_{rq} : Composantes du courant rotorique suivant l'axe d, respectivement q.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Composantes du flux statorique suivant l'axe d, respectivement q.

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$: Composantes du flux rotorique suivant l'axe d, respectivement q.

i_{md}, i_{mq} : Composantes du courant magnétisant suivant l'axe d, respectivement q.

$\varphi_{md}, \varphi_{mq}$: Composantes du flux magnétisant suivant l'axe d, respectivement q.

i_m : Courant magnétisant global.

φ_m : Flux magnétisant.

L_m : Inductance magnétisante statique.

L'_m : Inductance magnétisante dynamique.

L_{md}, L_{mq} : Inductance magnétisante suivant l'axe d et q respectivement.

L_{dq} : Inductance d'effet croisé.

C: capacité par phase.

g : Glissement.

FEM : Force électromotrice.

MCC : Machine à courant continu

MAS : Machine asynchrone

INTRODUCTION GENERALE

Malgré son ancienne conception et sa consommation réactive importante, le moteur asynchrone reste toujours d'actualité et représente la plus grande partie des machines électriques mises en service dans l'industrie, vu toutes les performances qu'offre ce type de machines électriques.

Le rotor de la machine asynchrone peut être bobiné ou à cage d'écureuil, ce dernier est beaucoup plus fréquent car il est beaucoup plus facile à construire que celui à rotor bobiné (pas d'enroulements rotoriques, pas de balais et pas d'entretien), il est donc peu onéreux et d'une robustesse plus grande.

Dans ce contexte, notre travail consiste à étudier la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil dans un fonctionnement en générateur autonome.

Après un bref rappel sur les équations des courants et des flux régissant la machine asynchrone à cage, on s'est intéressé à donner le modèle de R.H.Park en régime saturé.

En utilisant le modèle cité ci-dessus, la deuxième partie porte sur l'étude du générateur asynchrone auto-amorcé, des simulations à vide sont faites à l'aide du logiciel Matlab et sont validées par des essais expérimentaux au laboratoire de l'école, enfin, nous montrons les résultats de simulation d'une connexion de la génératrice asynchrone autonome à différents types de charges.

CHAPITRE I : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN REGIME SATURE

Introduction

La machine asynchrone à cage est facilement saturable, de plus elle a une dynamique fortement non linéaire et ses variables d'états ne sont pas toutes mesurables. L'étude du comportement en régime dynamique de cette machine est donc une tâche difficile qui nécessite l'élaboration d'un modèle précis afin de bien prédire par voie de simulation son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés.

I.1.Prise en compte de l'effet de la saturation

La machine, dans sa partie intégrante, est composée d'un empilage de tôles ferromagnétiques. Exposées à un champ magnétique, ces tôles s'aimantent naturellement, en outre, cette aimantation est limitée.

On dit que le matériau se sature lorsque sa perméabilité diminue avec le degré d'induction magnétique [1] figure (I.1)

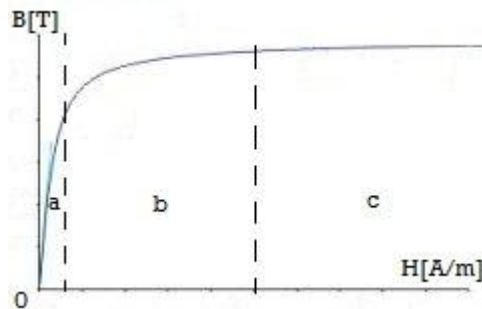


Fig. I.1. La courbe de la première aimantation d'un matériau ferromagnétique
(a) Zone linéaire ; (b) Coude de saturation ; (c) Zone de forte saturation

I.2.Le phénomène de saturation croisée

L'effet de la saturation entraîne également un phénomène secondaire dit "l'effet croisé" qui peut être considéré comme un couplage magnétique entre les enroulements d'axe d et q de la machine biphasée (machine de R.H Park), et qui apparaît si la machine asynchrone associée est saturée. Ces deux bobinages sont par définition spatialement en quadrature et donc, à priori, ne devraient avoir aucune interaction mutuelle en régime non saturé.

Son impact est non négligeable lors des régimes transitoires.

Ces deux phénomènes conjugués doivent donc être pris en compte par le modèle équivalent afin d'obtenir le plus de concordance entre le comportement réel ainsi celui donné par le modèle. L'effet croisé de la saturation est un phénomène analogue à celui de la réaction d'induit de la machine à courant continu ainsi que la machine synchrone à pôles saillants [2].

I.3. Mise en œuvre du modèle saturé

Dans notre approche, nous privilégions la prise en compte de la saturation magnétique au travers d'inductances variables. Ceci permet d'une part de simplifier le modèle de la machine et d'autre part de faire apparaître les grandeurs d'état.

L'approche de modélisation est donc directement issue du modèle de la machine asynchrone élaboré en régime linéaire.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_{sd}/dt \\ di_{sq}/dt \\ di_{rd}/dt \\ di_{rq}/dt \end{bmatrix} \quad (I.1)$$

Nous allons, dans ce qui suit, déterminer les expressions des inductances en tenant compte des effets de la saturation et du couplage croisé tout en considérant des inductances de fuites dans l'air.

Pour aborder le modèle en régime saturé, reprenons les équations (I.1) dans le repère de R.H Park, chacun des flux peut être décomposé en flux magnétisant et un flux de fuite.

$$\Phi_{sd} = l_s i_{sd} + \Phi_{md} \quad (I.2)$$

$$\Phi_{sq} = l_s i_{sq} + \Phi_{mq} \quad (I.3)$$

$$\Phi_{rd} = l_r i_{rd} + \Phi_{md} \quad (I.4)$$

$$\Phi_{rq} = l_r i_{rq} + \Phi_{mq} \quad (I.5)$$

En considérant les courants magnétisants de la machine à partir des composantes des courants statoriques et rotoriques suivant les deux axes d et q comme suit

$$i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \quad (I.6)$$

$$i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \quad (I.7)$$

Nous pouvons exprimer chacun des deux flux magnétisants par :

$$\Phi_{md} = L_m \cdot i_{md} \quad (I.8)$$

$$\Phi_{mq} = L_m \cdot i_{mq} \quad (I.9)$$

L_m est appelée "inductance magnétisante statique". L'épaisseur de l'entrefer étant supposée constante, L_m , en fonction du courant, est identique suivant les deux axes d et q.

Après calculs, on obtient, pour les flux statoriques et rotoriques suivant les deux axes, les expressions suivantes :

$$\Phi_{sd} = l_s i_{sd} + L_m \cdot i_{md} \quad (I.10)$$

$$\Phi_{sq} = l_s i_{sq} + L_m \cdot i_{mq} \quad (I.11)$$

$$\Phi_{rd} = -l_r i_{sd} + (l_r + L_m) \cdot i_{md} \quad (I.12)$$

$$\Phi_{rq} = -l_r i_{sq} + (l_r + L_m) \cdot i_{mq} \quad (I.13)$$

Le niveau de saturation de la machine est une fonction des ampères-tours globaux de la machine. Par conséquent, on définit le module du courant magnétisant global sous la forme suivante :

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (I.14)$$

Dans ce cas, L_m , qui caractérise la magnétisation de la machine, peut être exprimée comme étant le rapport de $|\Phi_m|$, flux total magnétisant de la machine par $|i_m|$:

$$L_m = \frac{|\Phi_m|}{|i_m|} \quad (I.15)$$

Cette inductance de magnétisation est, bien évidemment, fonction du courant $|i_m|$,

$L_m = f(|i_m|)$. Pour une machine donnée, son identification s'obtient expérimentalement au travers de la caractéristique interne de la machine comme nous allons l'expliquer plus loin.

Dans le cas d'un prototype virtuel, il est possible d'obtenir cette caractéristique à partir d'une modélisation numérique tenant compte de la non linéarité des matériaux ferromagnétiques constituant la machine [3].

Nous allons chercher à exprimer l'une des dérivées du flux par rapport au temps.

Soit $\frac{d\Phi_{sd}}{dt}$:

D'après l'expression (I.9), cette dérivée s'écrit

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = \frac{d}{dt} (l_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{md})$$

Les inductances de fuite étant supposées constantes, on aboutit à :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot \frac{dL_m}{dt}$$

Comme L_m varie avec le module de $|i_m|$, l'équation précédente peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot L'_m \frac{d|i_m|}{dt}$$

Avec :

$$L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|}$$

Sachant que :

$$\frac{d|i_m|}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} = \frac{i_{md}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt}$$

La dérivée temporelle du flux Φ_{sd} devient alors :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot L'_m \left(\frac{i_{md}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt} \right)$$

En développant les différents termes, on obtient :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + \left(L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right) \frac{di_{md}}{dt} + L'_m \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt}$$

Trois termes peuvent être distingués :

- Le premier $l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt}$ est issu du flux de fuites.
- Le second $\left(L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right) \frac{di_{md}}{dt}$ est dû à la saturation suivant l'axe direct.
- Le troisième $L'_m \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt}$ reflète l'effet du courant suivant l'axe q sur le flux direct.

C'est l'effet croisé.

Les dérivées temporelles des flux Φ_{sq} , Φ_{rd} et Φ_{rq} peuvent être exprimées de manière similaire. Ainsi, les flux seront fonction des courants et des diverses inductances introduites précédemment. Les équations électriques de la machine asynchrone s'écrivent alors, sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (L_m + l_r) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (L_m + l_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L'_m \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & L'_m \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} & L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & l_r + L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L'_m \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & -l_r & L'_m \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_{sd}/dt \\ di_{sq}/dt \\ di_{md}/dt \\ di_{mq}/dt \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

On pose :

$$L_{md} = L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \quad (I.17)$$

$$L_{mq} = L_m + L'_m \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \quad (I.18)$$

$$L_{dq} = L'_m \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} \quad (I.19)$$

L_{md} et L_{mq} représentent les inductances magnétisantes dynamiques suivant les axes direct et en quadrature respectivement. Dans le cas d'une caractéristique linéaire des matériaux ferromagnétiques $L_{md} = L_{mq} = L_m = \text{Constante}$.

L_{dq} représente l'inductance d'effet croisé, exprime la variation de L_m en fonction de i_{md} et i_{mq} . Elle quantifie le couplage croisé entre les bobinages des axes d et q. Dans l'hypothèse de la linéarité des matériaux, $L_{dq} = 0$.

La relation matricielle (I.16) devient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (L_m + l_r) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (L_m + l_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_s & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_r & 0 & l_r + L_{md} & L_{dq} \\ 0 & -l_r & L_{dq} & l_r + L_{mq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_{sd}/dt \\ di_{sq}/dt \\ di_{md}/dt \\ di_{mq}/dt \end{bmatrix} \quad (I.20)$$

Dans le modèle développé ci-dessus, les courants rotoriques ne sont plus explicites mais sont 'inclus' implicitement dans les expressions des courants magnétisants i_{md} et i_{mq} .

Afin de générer une tension statorique à la fréquence 50Hz, On impose un entrainement au synchronisme du rotor. Du coup, on choisit de travailler avec le référentiel de R.H Park lié au stator pour diminuer le nombre d'inconnus.

Ainsi, le système (I.20) devient :

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r(L_m + l_r) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r(L_m + l_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_s & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_r & 0 & l_r + L_{md} & L_{dq} \\ 0 & -l_r & L_{dq} & l_r + L_{mq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_{sd}/dt \\ di_{sq}/dt \\ di_{md}/dt \\ di_{mq}/dt \end{bmatrix} \quad (I.21)
\end{aligned}$$

En reprenant la relation précédente du couple et en appliquant la transformation de R.H Park aux différents flux et courants, on aboutit à l'expression suivante du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \cdot L_m \cdot (i_{md} \cdot i_{sq} - i_{mq} \cdot i_{sd}) \quad (I.22)$$

Conclusion

La machine asynchrone soumise à des niveaux de flux élevés présente des variations non linéaires des inductances ou des flux en fonction des courants magnétisants.

La connaissance des évolutions des inductances magnétisantes statiques et dynamiques en fonction des courants magnétisants en chaque point de fonctionnement permet la prise en considération du phénomène de la saturation. En conséquence, l'étude dynamique de la machine fondée sur le modèle saturé de R.H Park devient plus complète et précise.

CHAPITRE II : AUTO-AMORÇAGE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE

Introduction

En l'absence de réseau pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. [4] [5] [6]

Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par des capacités directement connectées sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées.

II.1. Prise en compte du phénomène de saturation

Le modèle de la machine asynchrone établi précédemment est, dans la plupart des cas, suffisant pour obtenir de bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage, impact de charge. . .) [6] [7]. Néanmoins, ce modèle utilise une inductance magnétisante M_{\max} constante, ce qui sous-entend que le matériau magnétique utilisé pour la conception de la machine est linéaire. La simulation du phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone par un banc de capacités ne peut se satisfaire de ce modèle puisque c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. En effet lorsque la machine est entraînée par un dispositif externe, la présence d'un champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée un couple électromagnétique engendrant une force électromotrice sur les enroulements statoriques. La connexion de capacités sur les phases du stator entraîne alors la création d'un courant réactif qui augmente le champ magnétique de la machine et par conséquent les forces électromotrices. C'est cette réaction cyclique qui permet à la machine d'arriver à un régime permanent situé dans la zone saturée.

La figure (II.1) représente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe du condensateur ($V_c = \frac{I_m}{C\omega}$) en fonction du courant I_m pour un fonctionnement à vide de la machine.

L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent. L'observation de ces courbes montre aisément que deux phénomènes peuvent modifier l'emplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique de magnétisation :

- La variation de la capacité d'auto-amorçage qui entraîne une modification de la pente de la droite de charge de la capacité
- La variation de la charge connectée sur la machine qui provoque une variation du glissement. Ceci rend la résistance R_r/g non négligeable et le courant est alors partagé entre l'inductance magnétisante et la résistance rotorique.

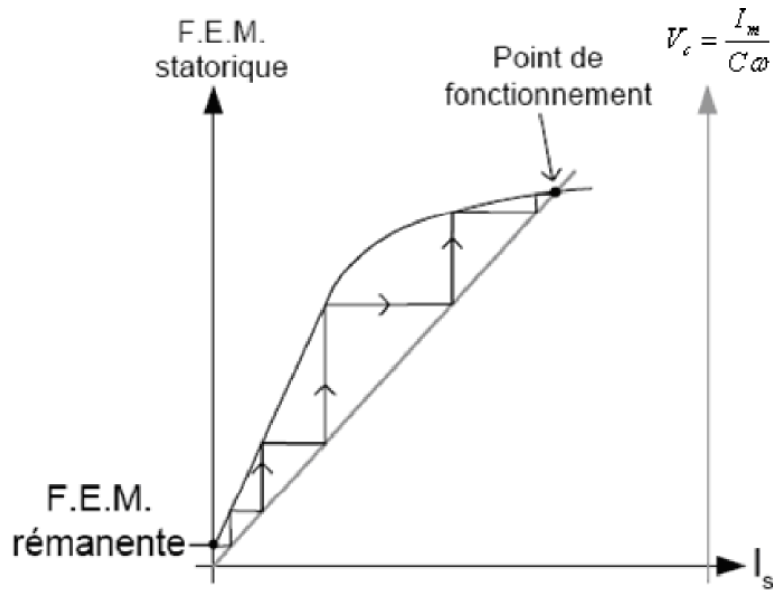


Fig.II.1 Phénomène d'auto-amorçage

Lorsque le point de fonctionnement est atteint, la machine délivre une tension au stator dont la valeur efficace est constante. Si l'inductance magnétisante est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non-saturé, la caractéristique de magnétisation ne présente alors pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. L'auto- amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie. Cette partie sera interprétée dans la partie simulation et expérimentation avec comparaison des courbes à l'appui.

II.2.Simulations et résultats expérimentaux

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire tiennent compte de la saturation du circuit magnétique et sont effectués en régime équilibré.

Ces essais consistent à valider le modèle du générateur asynchrone autonome.

La simulation de l'auto-amorçage du générateur a été effectuée à l'aide du logiciel Matlab.

II.2.1.Essai à vide

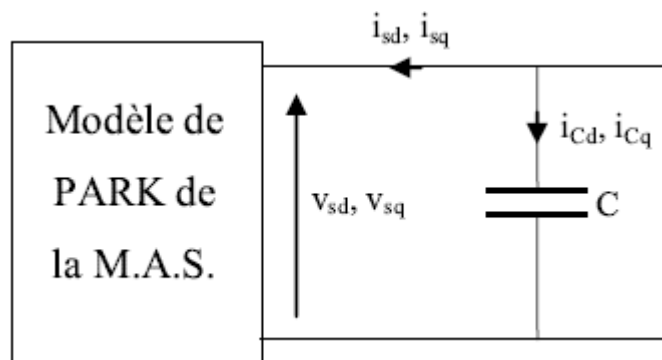


Fig.II.2.Générateur auto-amorçé à vide

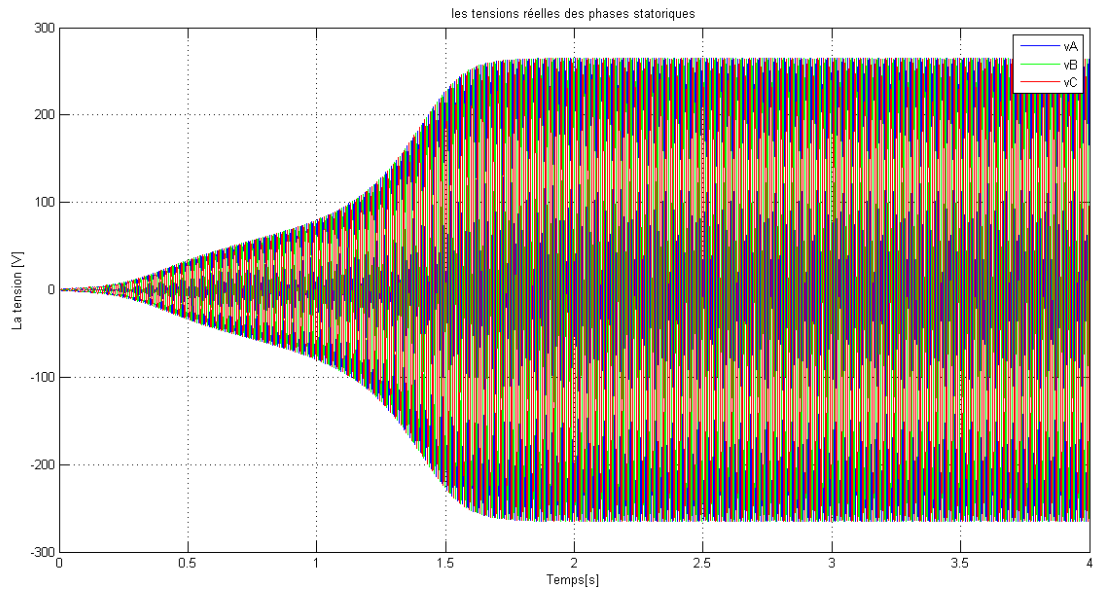


Fig.II.3.Tensions statoriques d’auto-amorçage obtenues par simulation

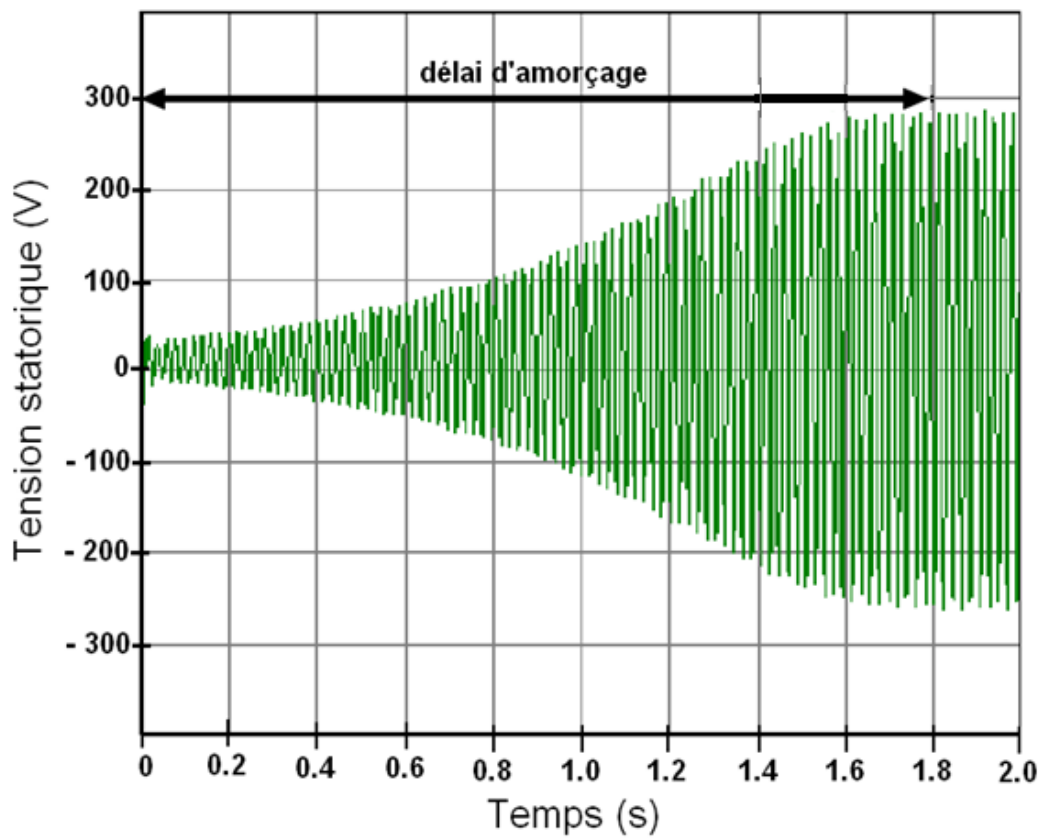


Fig II.4.Tension statorique d’auto-amorçage obtenue expérimentalement

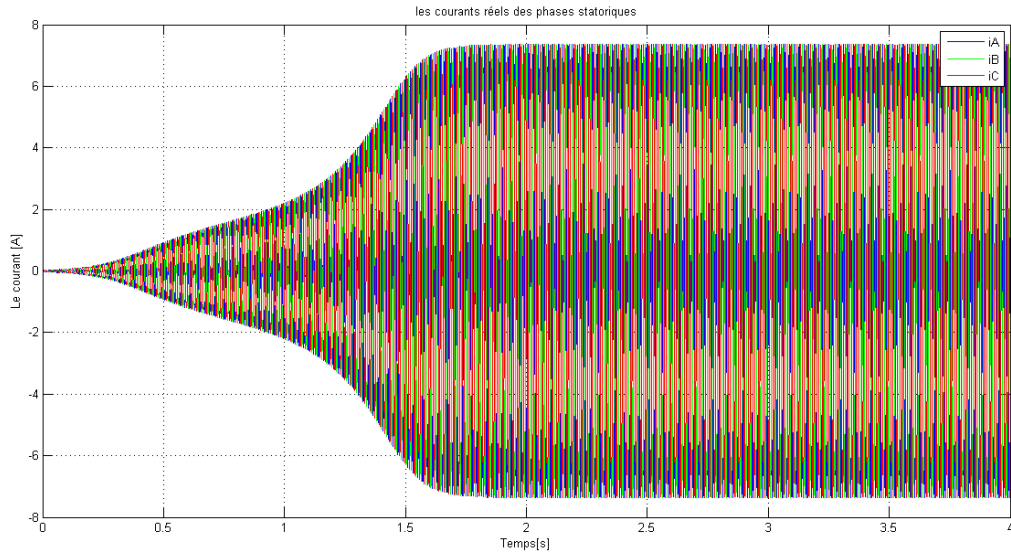


Fig.II.5.Courants statoriques d'auto-amorçage obtenus par simulation

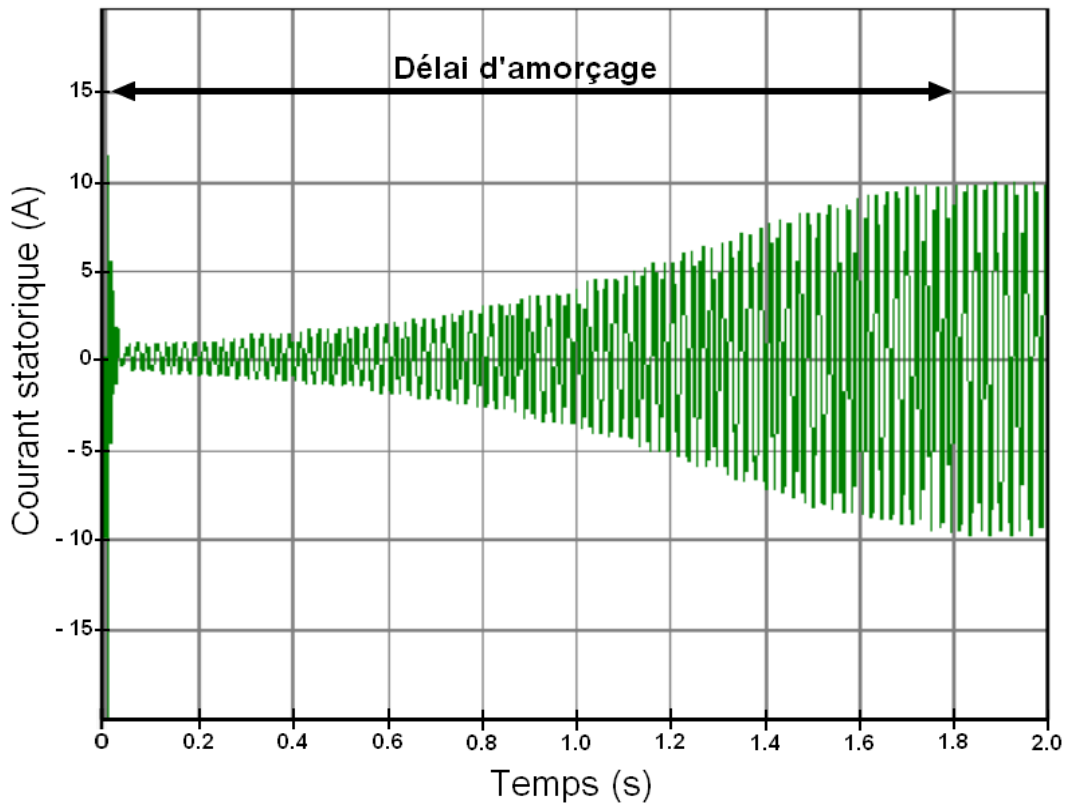


Fig.II.6.Courant statorique d'auto-amorçage obtenus expérimentalement

Interprétations

Dans cette application, la valeur de la capacité d'excitation est de $90\mu\text{F}$, alors que la vitesse de rotation est considérée fixe et égale à 1500tr/min

Les figures (II.3) et (II.5) représentent respectivement l'évolution de la tension et le courant statoriques en fonctionnement à vide du générateur asynchrone à cage obtenus par simulation.

Au démarrage, la tension et le courant générés croient de façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 290V et à 8A en régimes totalement établis après écoulement d'une période temporelle de 1.7s.

En comparant les résultats obtenus par simulation avec ceux obtenus expérimentalement, on observe que la valeur initiale de la tension, avant le processus d'amorçage est un peu différente en simulation et dans l'essai expérimental. Cette différence est due aux conditions initiales correspondantes à l'éventuelle charge présente dans le banc de capacités et à la valeur de l'aimantation rémanente dans le rotor de la machine. En effet celle-ci est différente après chaque utilisation de la machine. Dans nos simulations, cette rémanence est prise en compte par une faible valeur initiale de l'ordre de 0,0054 Wb sur un des intégrateurs de flux.

II.2.2.Essais en charge

II.2.2.a. Charge R

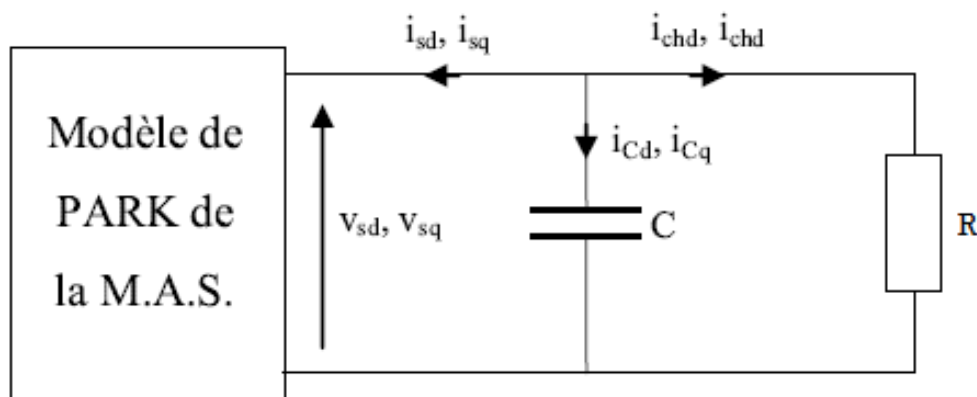


Fig.II.7.Générateur auto-amorcé débitant sur une charge résistive

Tels que :

$$\frac{dv_{cd}}{dt} = -\frac{1}{c} \left(\frac{v_{sd}}{R} + i_{sd} \right)$$

$$\frac{dv_{cq}}{dt} = -\frac{1}{c} \left(\frac{v_{sq}}{R} + i_{sq} \right)$$

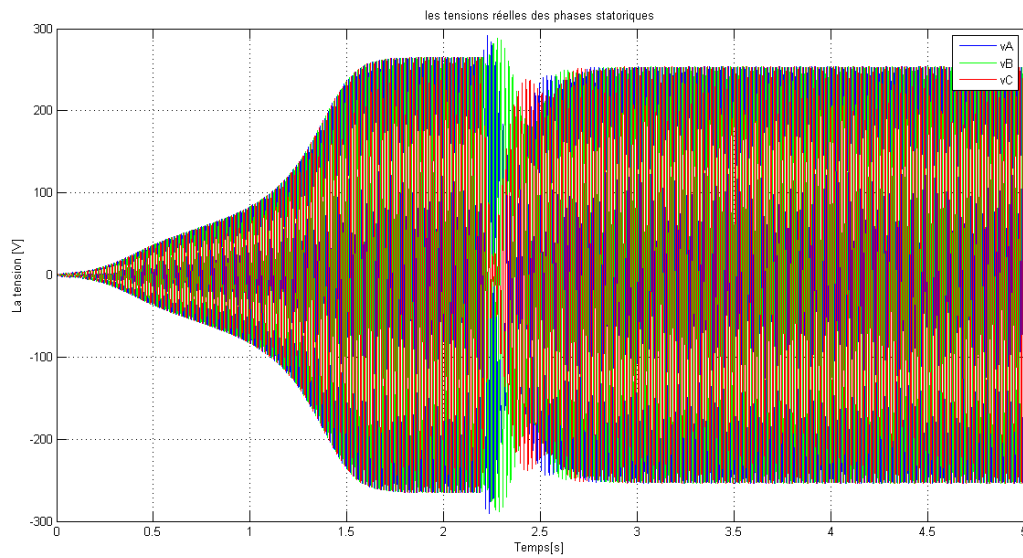


Fig.II.8.Tensions statoriques lors de la connexion du générateur asynchrone avec une charge résistive de $5k\Omega$

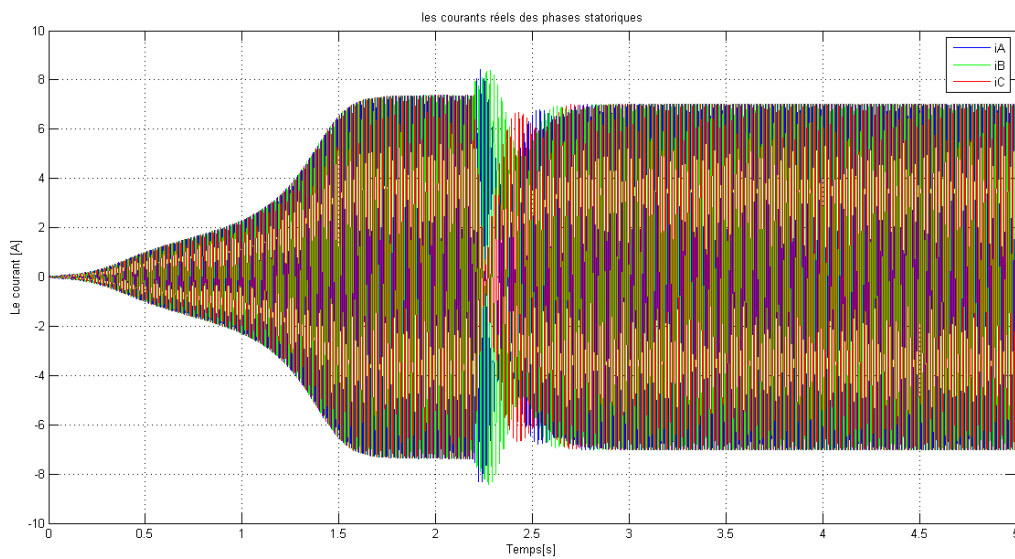


Fig.II.9.Courants statoriques lors de la connexion du générateur asynchrone avec une charge résistive de $5k\Omega$

Interprétations

On constate une légère chute de la tension statorique délivrée par le générateur asynchrone autonome. En effet, celle-ci passe d'une tension à vide de 280V pour ensuite atteindre environ 250V en charge.

Cette baisse de tension peut être référée à la consommation de la résistance en énergie active par effet Joule.

Le courant traversant la charge résistive est directement proportionnel à la tension statorique à ses bornes. Il passe d'une valeur initiale d'environ 7.5A pour se stabiliser après connexion de la résistance à une valeur de 7A.

II.2.2.b. Charge R-L

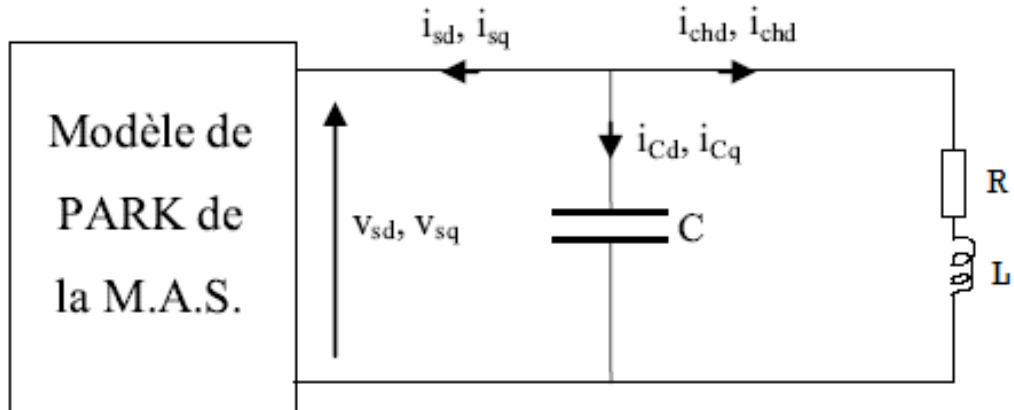


Fig.II.10.Générateur auto-amorcé débitant sur une charge R-L

Avec :

$$\begin{cases} \frac{di_{chd}}{dt} = \frac{1}{L}(v_{sd} - Ri_{chd}) \\ \frac{dv_{cd}}{dt} = -\frac{1}{c}(i_{chd} + i_{sd}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{di_{chq}}{dt} = \frac{1}{L}(v_{sq} - Ri_{chq}) \\ \frac{dv_{cq}}{dt} = -\frac{1}{c}(i_{chq} + i_{sq}) \end{cases}$$

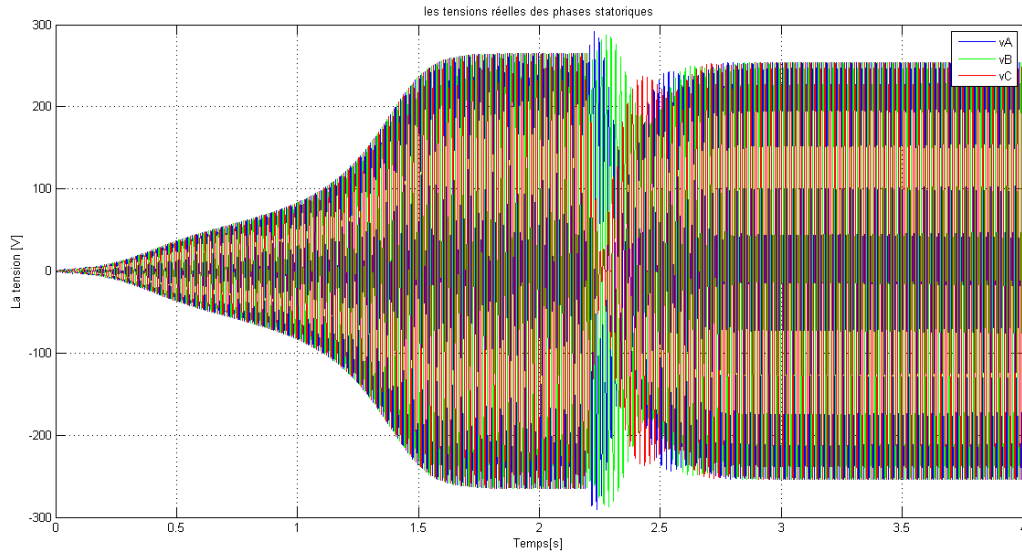


Fig.II.11.Tensions statoriques lors de la connexion du générateur asynchrone avec une charge R-L (5kΩ-1mH)

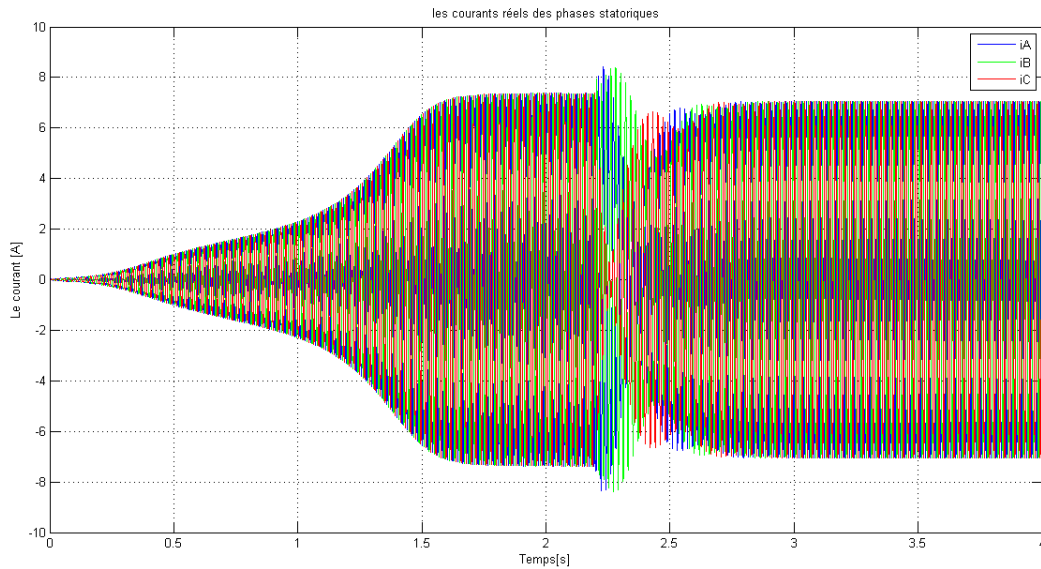


Fig.II.12.Courants statoriques lors de la connexion du générateur asynchrone avec une charge R-L (5kΩ-1mH)

Interprétations

Pour le temps de retard (partie transitoire), on constate qu'il est directement proportionnel à la constante de temps τ propre au circuit R-L tel que :

$$\tau = \frac{L}{R}$$

En ce qui concerne la valeur permanente de la tension statorique délivrée par le générateur asynchrone autonome, on remarque qu'elle dépend fortement de la valeur de l'inductance connectée puisque cette dernière a un effet démagnétisant contraire à la fonction principale du

banc de capacités. Du coup, le banc de capacité d'auto-amorçage ponctionne de l'énergie pour la magnétisation de la machine et pour l'alimentation en réactif de cette charge inductive.

II.2.2.c. Charge R-L-C

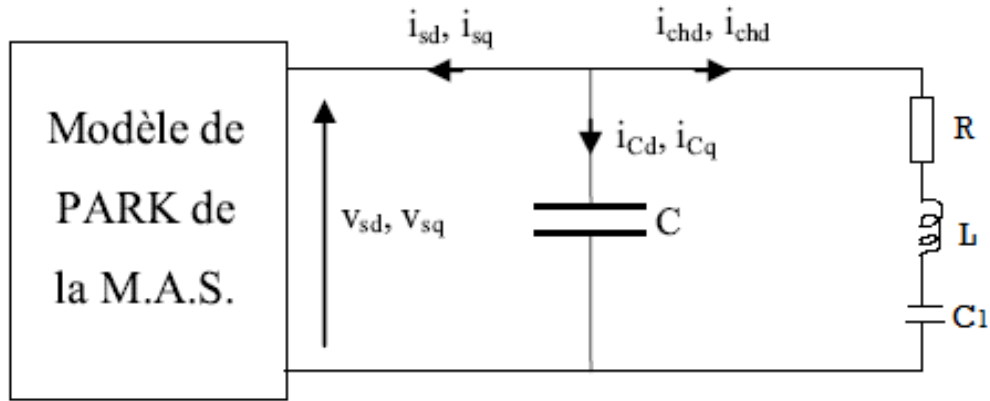


Fig.II.13.Générateur auto-amorçé débitant sur une charge R-L-C

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{chd}}{dt} = \frac{1}{L}(v_{sd} - v_{c1d} - Ri_{chd}) \\ \frac{dv_{cd}}{dt} = -\frac{1}{c}(i_{chd} + i_{sd}) \\ \frac{dv_{c1d}}{dt} = \frac{1}{c}i_{chd} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{chq}}{dt} = \frac{1}{L}(v_{sq} - v_{c1q} - Ri_{chq}) \\ \frac{dv_{cq}}{dt} = -\frac{1}{c}(i_{chq} + i_{sq}) \\ \frac{dv_{c1q}}{dt} = \frac{1}{c}i_{chq} \end{array} \right.$$

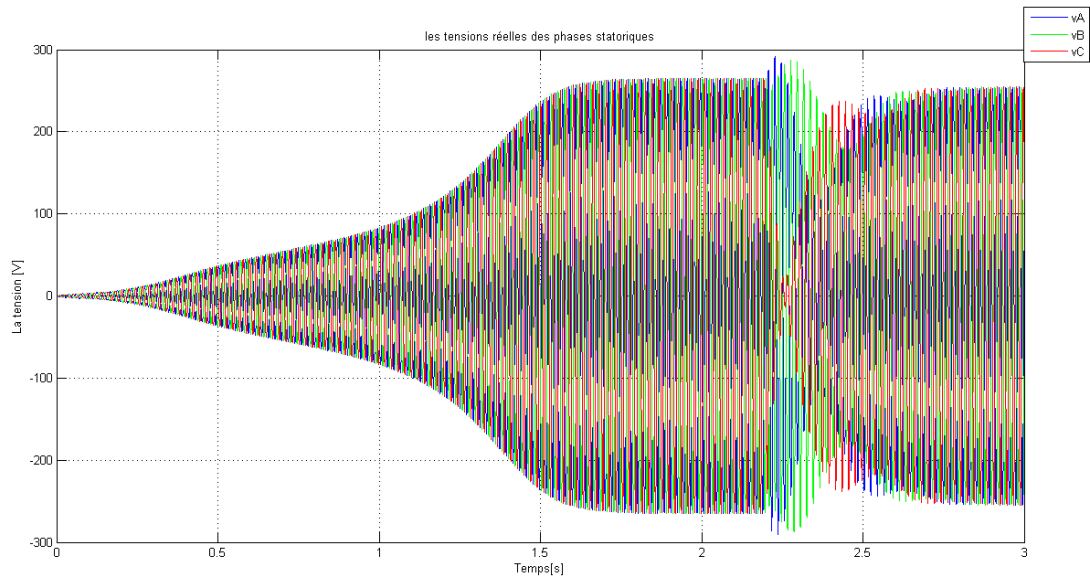


Fig.II.14.Tensions statoriques lors de la connexion du générateur asynchrone avec une charge R-L-C
($5k\Omega$ - $10mH$ - $9\mu F$)

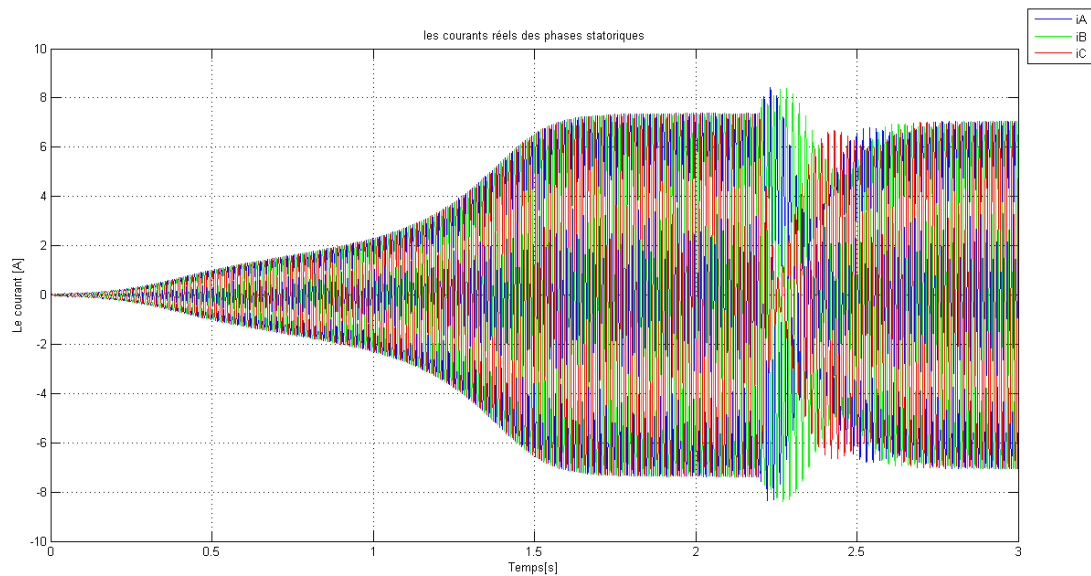


Fig.II.15.Courants statoriques lors de la connexion du générateur asynchrone avec une charge R-L-C
($5k\Omega$ - $10mH$ - $9\mu F$)

Interprétations

La capacité, insérée en série avec l'inductance, aura tendance à satisfaire la consommation en énergie réactive de cette dernière. En conséquence, cette charge capacitive contribue avec le banc de capacités d'auto-amorçage à la production de l'énergie réactive.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes d'abord intéressés à la comparaison des résultats expérimentaux de l'auto-amorçage du générateur asynchrone à vide avec ceux élaborés par simulation en tenant compte de la saturation magnétique qui permet de limiter les amplitudes des tensions et courants en régime établi. L'interprétation des résultats ainsi obtenus a révélé que ceux donnés par la simulation sont assez satisfaisants, ce qui nous a permis de valider le modèle. A travers les équations théoriques qui régissent le système, nous avons par la suite étudié le comportement du générateur lors de sa connexion avec différents types de charges par voie de simulation.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette thèse était de modéliser la machine asynchrone à cage d'écureuil en tenant compte du phénomène de saturation et étudier son comportement en fonctionnement autonome, et lors d'une alimentation de différentes charges.

Après avoir rappelé le modèle de R.H.Park simplifié en fonctionnement en régime saturé de la machine et cité ses principaux procédures de calculs, nous avons procédé dans le deuxième chapitre à l'utilisation de ce modèle pour la visualisation du comportement du générateur asynchrone auto-amorcée à vide puis en charge.

les simulations numériques pour le cas d'un fonctionnement à vide ont été validés par l'expérience avec satisfaction. Tandis que pour les simulations en charge restent des résultats purement théoriques puisqu'ils n'ont pas été vérifiés expérimentalement.

ANNEXE

Présentation du banc d'essai expérimental

La machine utilisée est une machine asynchrone à cage dont les caractéristiques sont : 4kW, 220/380V, 4 pôles, 50Hz, 1435tr/mn, $\cos\phi=0,83$. Cette machine a été fabriquée localement. Outre la machine asynchrone, le banc d'essais est doté d'une machine à courant continu de 3,5kW, 11 0V, 1500tr/mn qui entraine la machine à cage. Les photos ci-dessous représentent le banc d'essais utilisé au laboratoire pour des tests expérimentaux ainsi que le schéma de principe.

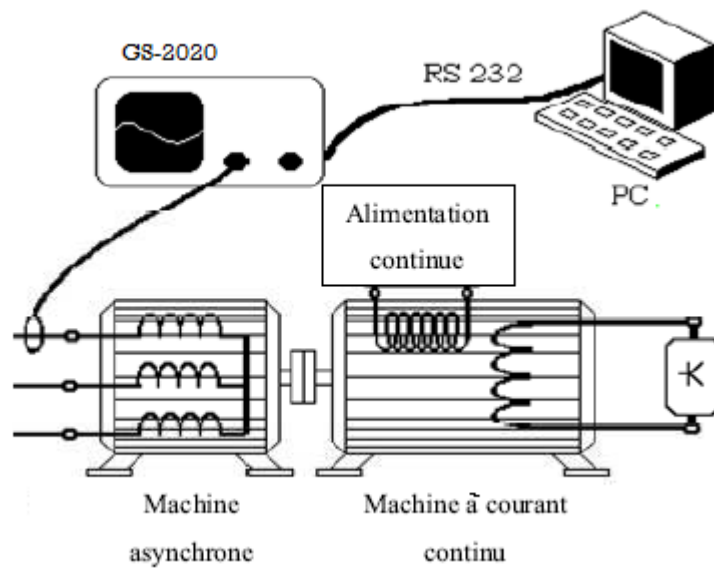


Schéma de principe du banc d'essai.

Caractéristiques techniques

$$R_s = 1.37\Omega$$

$$R'_r = 1.72\Omega$$

$$l_1 = 7.21\text{mH}$$

$$l_2 = 7.21\text{mH}$$

$$M = 70.14\text{mH}$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. JUFER, « Circuits magnétiques-Principes », Techniques de l'ingénieur, Électromagnétisme pour le génie électrique, d1050, août 2010.
- [2] A. NESBA, « Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, E.N.P, Alger, 2007.
- [3] M. K. IDJDARENE, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », Thèse de doctorat, Université Lille 1, mai 2010.
- [4] J. CHATELAIN, « Machines électriques, Traité d'électricité », Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.
- [5] F. POITIERS, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [6] L. MUTREL, « Régimes statique et dynamique des Machines Asynchrones », Technosup, édition Ellipses
- [7] D. KAIROUS, S. MEKHTOUB, R. IBTIOUEN, O. TOUHAMI, « Modèle d'un générateur asynchrone auto-amorcé lors d'un retour réseau », Algerian Journal of Technology, P49-55, ENP, 2005.